
TEKSTİL BİLİMLERİ VE MÜHENDİSLİĞİ DEĞERLENDİRMELERİ

Editör: Dr.Öğr.Üyesi Müslüm EROL

Tekstil Bilimleri ve Mühendisliği Değerlendirmeleri

Editör

Dr.Öğr.Üyesi Müslüm EROL

yaz
yayınları

2025

**Tekstil Bilimleri ve Mühendisliği
Değerlendirmeleri**

Editör: Dr.Öğr.Üyesi Müslüm EROL

© YAZ Yayınları

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayınlanamaz, depolanamaz.

E_ISBN 978-625-5838-89-6

Ekim 2025 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar/AFYONKARAHİSAR

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

info@yazyayinlari.com

İÇİNDEKİLER

Doğal Malzemelerin Tekstil Endüstrisindeki Kullanımı: Minerallerden Elyafa	1
<i>Devrim Demiray SOYASLAN</i>	
Yeni Nesil Tekstil Malzemeleri: Akıllı, Sürdürülebilir ve Fonksiyonel Yaklaşımlar	16
<i>Devrim Demiray SOYASLAN</i>	

"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir."

DOĞAL MALZEMELERİN TEKSTİL ENDÜSTRİSİNDEKİ KULLANIMI: MİNERALLERDEN ELYAFA

Devrim DEMİRAY SOYASLAN¹

1. GİRİŞ

İlk bakışta tekstil mühendisliği, jeolojik mühendisliği ve malzeme mühendisliği üç farklı branş gibi görünebilir; ancak gerçekte, bu üç branş, doğal kaynaklardan elde edilen hammaddelerin nihai ürünün üretimi, işlenmesi ve performansı üzerindeki etkisi açısından birbirine son derece yakından bağlıdır. Fonksiyonel tekstil teknolojilerinin gelişmesi sonucunda, özellikle son yıllarda jeolojik kaynaklardan elde edilen hammaddelere olan ilgi önemli ölçüde artmıştır. Bu çerçevede, tekstil endüstrisi, kaolin, bentonit, talk, zeolit, barit, kireçtaşı, silika, bazalt ve diğerleri dâhil olmak üzere, ancak bunlarla sınırlı olmamak üzere, minerallerden elde edilen hammaddeleri yaygın olarak kullanmaktadır. Bu malzemeler, dolgu maddesi, yüzey kaplama ajanı, fiber takviyesi, filtrasyon elemanı, alev geciktirici ve fonksiyonel katkı maddesi olarak çeşitli kapasitelerde kullanılmaktadır (Hassine ve diğerleri, 2016; Vinokurov ve diğerleri, 2020).

Bazalttan yapılan kumaşlar, nanokompozit malzemeler ve zeolitten yapılan filtrasyon tekstilleri, hem performansları hem de sürdürülebilirlikleri açısından yeni nesil tekstil çözümlerinin geliştirilmesinde önemli rol oynayan ürün türlerine örneklerdir.

¹ Doç. Dr. Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, dsayaslan@mehmetakif.edu.tr, ORCID: 0000-0002-5145-8551.

Bazan ve ark. 2020 ile Shaikh ve ark. 2023'e göre, bu malzemelerin fiziksel, kimyasal ve morfolojik özellikleri, onları hem çevreci hem de teknolojik tekstillerin üretiminde vazgeçilmez kılmaktadır.

Sürdürülebilir tekstil üretimi bağlamında, yenilenebilir doğal kaynaklardan elde edilen minerallerin kullanımı son zamanlarda son derece önemli bir faktör haline gelmiştir. Avrupa Birliği tarafından oluşturulan Yeşil Mutabakat'ın bir parçası olan, Karbon Sınır Vergisi Mekanizması (CBAM= Carbon Border Adjustment Mechanism) gibi politikalar ve düzenlemeler, sanayi sektörünü düşük karbon ayak izine sahip hammaddeleri kullanmaya teşvik etmektedir. Avrupa Birliği Komisyonu'na (2023) göre, jeolojik malzemeler tekstil sektöründe yaratıcı kullanımlar için teşvik edici rol oynamaktadır. Bu malzemeler, yalnızca çevresel açıdan faydalı olmakla kalmayıp aynı zamanda ekonomik açıdan rekabetçi ve teknik açıdan üstün çözümler sunmaktadır (EU, 2023).

Kitabın bu bölümü kapsamında, tekstil endüstrisinde doğal malzemelerin kullanımı, birçok mineral türüne göre metodik bir şekilde tartışılacaktır. Doğrudan elyaf formuna dönüştürülebilen bazalt elyafı gibi mineraller ilk olarak incelenecektir. Bunu; kaolin, bentonit ve zeolit gibi katkı maddesi ve kaplama olarak kullanılan minerallerin tekstil teknolojisinin gelişiminde oynadığı işlevin tartışması izleyecektir. Ayrıca, bu malzemelerin sürdürülebilirlik, enerji verimliliği, geri dönüşüm ve çevre dostu üretim süreçleri üzerindeki etkisine ilişkin yürütülen araştırmalardan elde edilen en son bulgular sunulacaktır.

2. MADEN KAYNAKLARI VE TEKSTİL ENDÜSTRİSİNDEKİ UYGULAMALARI

Jeolojik süreçlerden kaynaklanan hammaddeler, tekstil endüstrisinin kullanışlı, uzun ömürlü ve çevre dostu yeni nesil malzemeler arayışına devam etmesiyle giderek daha önemli hale gelmiştir. Bu malzemeler sadece katkı maddesi olarak kullanılmakla kalmayıp, lif olarak kullanılabilen bir malzemeye de dönüştürülebilir. Bir sonraki alt bölümlerde, tekstilde en sık kullanılan mineral bazlı malzemeler ve bu malzemelerin kullanım alanları incelenecektir.

2.1. Bazalt Lifleri

2.1.1. Bazaltın Tanım ve Kökeni

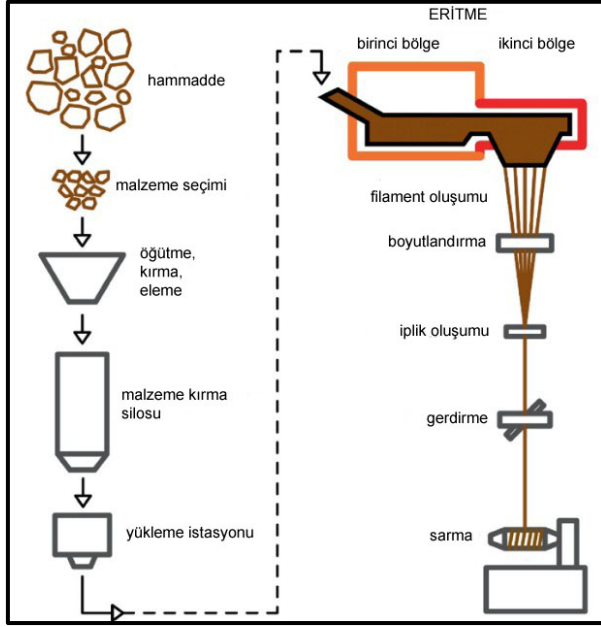
Volkanik kayalar olarak bilinen kayaç sınıfı, Dünya'nın kabuğunda bol miktarda bulunabilen bir tür jeolojik malzeme olan bazaltı içerir. Fiber üretimi için ideal olan bazalt çeşitlerine örnek olarak, %45 ile %55 arasında değişen bir SiO₂ (silikon dioksit) yüzdesine sahip olanlar verilebilir. Plajiyoklaz, olivin ve piroksen, bu malzemeyi oluşturan minerallerden bazılarıdır ve bu da malzemenin 1.450 ila 1.550 santigrat derece arasında eriyip lif haline getirilmesini sağlar (Karvanis ve diğerleri, 2020). Bazalt lifi doğrudan doğadan elde edilen bir hammaddeden yapıldığı için, cam lifine benzer bir şekilde üretilmesine rağmen herhangi bir kimyasal katkı maddesi gerektirmez. Bazalt liflerinin kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Bazalt liflerinin kimyasal bileşimi (Ayub et al., 2015).

Bileşen	Ağırlık (%)
SiO ₂	51,6-59,3
Al ₂ O ₃	14,6-18,3
Al ₂ +FeO	5,9-9,4
CaO	3,0-5,3
MgO	9,0-14,0
TiO ₂	0,8-2,25
Na ₂ O+K ₂ O	0,8-2,25
Diğerleri	0,09-0,13

2.1.2. Bazalt Liflerinin Üretim Prosedürleri

Bazalt lifi, cam lifinin oluşturulmasında kullanılan prosedüre benzer olan, eriyik eğirme olarak bilinen işlemle üretilir. Yüksek sıcaklıklarda doğal bazalt taşlarının erimesinin ardından, taşlar lifler halinde çekilir. Üretim sürecinde herhangi bir kimyasal katkı maddesi veya bağlayıcı kullanılmadığı için üretimi daha kolay, daha uygun maliyetli ve daha çevrecidir (Şekil 1).



Şekil 1. Bazalt elyaf üretim süreci akış şeması (Mancini, 2023)

2.1.3. Bazalt Liflerinin Kullanım Alanları

Teknik tekstil ve endüstriyel tekstil sektörlerinde bazalt lifleri malzeme olarak oldukça tercih edilmektedir. Aşağıda kullanımına dair bazı dikkate değer örnekler verilmiştir:

Isı yalıtımı: Yangına dayanıklı kumaşlarda kullanılır ve 1000 °C kadar ısıya dayanıklıdır.

Alev geciktirici tekstiller: Yangın gereksinimlerine uygun iş güvenliği tekstillerine alev geciktirici tekstiller denir.

Otomobil tekstilleri: Otomobiller için üretilen tekstiller arasında yüksek sıcaklığa ve sürtünmeye dayanıklı iç döşemeler bulunur.

Filtrasyon: Yüksek sıcaklık filtreleri, baca gazı sistemleri ve gaz türbinleri gibi yerlerde filtrasyon için kullanılır.

Kompozit takviyesi: Takviye için fiberglasa kıyasla kompozit malzemeler kullanır.

2.1.4. Bazalt Liflerinin Teknik Özellikler

Bazalt elyaf, geleneksel cam elyaflarına göre bazı teknik üstünlükler sunar (Tablo 2):

Tablo 2. Bazalt ve cam elyafların teknik özellikleri karşılaştırması (Karvanis ve diğerleri, 2020)

Özellik	Bazalt Elyafı	Cam Elyafı
Çekme Dayanımı (MPa)	2900-4500	3000-3500
Elastik Modül (GPa)	90-110	70-80
Erime Sıcaklığı (°C)	1450-1500	1200-1250
Yangına Dayanım	Çok yüksek	Orta
Kimyasal Dayanıklılık	Yüksek	Orta
UV Direnci	Yüksek	Düşük-Orta
Karbon Ayak İzi	Düşük	Yüksek

2.1.5. Sürdürülebilirlik ve Pazar Potansiyeli

Doğal kökeni, enerji verimli üretim prosedürleri ve yüksek mukavemeti nedeniyle bazalt elyaf, sürdürülebilir tekstil ürünlerinin üretimi için önemli bir seçimdir. 2023 yılında yürürlüğe giren Avrupa Birliği'nin Sınırdaki Karbon Düzenlemesi Mekanizması (SKDM=CBAM) uygulama çerçevesinin bir parçası olarak, düşük karbon emisyonlu hammaddelere ek destek sağlanmaktadır (AB Komisyonu, 2023). Dünya çapındaki bazalt elyaf pazarının 2022'de 286 milyon ABD doları değerinde olduğu belirlenmiş ve yıllık %12,5 büyüme oranıyla 2027'ye kadar 517

milyon ABD dolarına ulaşması beklenmektedir (Globe Newswire, 2023).

2.1.6. Geliştirme için Zorluklar ve Fırsatlar

Dünya genelinde endüstriyel tesislerin yetersizliği nedeniyle teknik altyapı harcamaları minimum düzeyde tutulmaktadır. Dokuma ve iplik haline getirme teknikleri hala geliştirilme aşamasındadır. Elyafın tekstil makineleriyle uyumluluğu konusunda, ele alınması gereken çeşitli uyum sorunları vardır ve bunlar hala geliştirilmeyi beklemektedir.

2.2. Nanokiller ve Kil Bazlı Kompozit Malzemeler

Nanokiller, yüksek yüzey alanı ve tabakalı yapıları sayesinde tekstil endüstrisinde fonksiyonel uygulamalarda önemli bir rol oynamaktadır (Moktar ve diğerleri, 2024). Özellikle montmorillonit, kaolinit ve halloysite gibi farklı nanokil türleri, kumaş kaplamalarında UV koruma, antibakteriyel özellik ve boya adsorpsiyonu gibi işlevler için kullanılabilmektedirler (Tablo 3).

Tablo 3. Başlıca nanokil türleri ve tekstil uygulamalarına uygun temel özellikleri (Hassine ve diğerleri, 2016)

Kil Türü	Yapısı	Yüzey Alanı (m ² /g)	İyon Değişim Kapasitesi (meq/100g)
Kaolinit	1:1	10-30	3-15
Montmorillonit	2:1	600-800	80-150
Halloysit	1:1	60-120	10-40
Sepiolit	2:1	200-400	20-40

2.2.1. Kil Minerallerinin Yapısı ve Sınıflandırılması

Kil mineralleri, tabakalı yapıya sahip, silikat temelli doğal minerallerdir. Yapısal olarak 1:1 (ör. kaolinit) veya 2:1 (ör. montmorillonit, bentonit) tipinde tabaka dizilimine sahiptirler. Bu yapılar sayesinde yüzey alanları oldukça yüksektir (100–800 m²/g) ve iyon değiştirme kapasiteleri geniştir. Bu özellikleri, onları tekstil endüstrisinde hem fonksiyonel kaplama hem de

boyar madde tutucu olarak kullanışlı kılmaktadır (Hassine ve diğerleri, 2016; Asgar ve diğerleri, 2021; Mohktar ve diğerleri, 2024)).

2.2.2. Tekstil Boyalarının Geri Kazanımı ve Arıtma Sistemleri

Tekstil boyama prosesleri yüksek miktarda su ve kimyasal tüketimi ile çevresel sorunlara neden olmaktadır. Kil mineralleri bu kirleticilerin sudan uzaklaştırılması için etkili adsorbanlar olarak kullanılmaktadır. Özellikle modifiye edilmiş montmorillonit, halloysite nanotüpleri ve sepiolit, kationik ve anyonik boyar maddelerin gideriminde başarı göstermektedir. Halloysite nanotüpler, içi boş silindirik yapıları sayesinde yüksek boyar madde tutma kapasitesine sahiptir (Vinokurov ve diğerleri, 2017; Song ve diğerleri, 2020;). Organokil modifikasyonu ile renk tutma kapasitesi artırılır; bu sayede geri kazanılan boyalar yeniden tekstil baskısında kullanılabilir.

2.2.3. Polimer-Kil Nanokompozitler

Tekstil yüzeylerine uygulanan polimerik kaplamalara nanokillerin eklenmesi, kumaşların dayanıklılığını ve fonksiyonelliğini artırmaktadır. Bu kompozitler; Antibakteriyel özellik, nem yönetimi (hidrofilik/hidrofobik yüzeyler), UV ışınlarına karşı koruma ve termal stabilite sağlarlar.

Bu amaçla polietilen, poliüretan, PVA gibi polimerlerle birlikte montmorillonit, sepiolit gibi killer kullanılmaktadır. Katkı oranı %3–10 arasında değişebilmektedir.

2.2.4. Sürdürülebilirlik Açısından Değerlendirme

Killer bol bulunan, düşük maliyetli ve çevre dostu minerallerdir. Tekstil endüstrisinde atık su arıtımı, pigment geri kazanımı ve kaplama işlemlerinde kullanımları; doğal kaynak tüketimini azaltır, kimyasal kullanımını sınırlar ve geri dönüşüm oranlarını artırır. Ayrıca killer, doğada kolay çözünebilir

olduğundan mikropplastik salımı riskini azaltan alternatif kaplama malzemeleridir.

Tablo 4. Kil minerallerinin kullanım alanları (Guin ve diğerleri, 2025)

Uygulama Alanı	Kullanılan Kil	Fonksiyon
Atık su arıtımı	Montmorillonit	Boya absorpsiyonu
Fonksiyonel kumaş kaplaması	Halloysit	UV koruma, antibakteriyel
Alev geciktirici tekstiller	Sepiolit	Termal direnç, duman azaltımı
Doğal boyama teknolojileri	Bentonit	Boya bağlayıcılık

2.2.5. Zorluklar ve Gelecek Yönelimler

Nanokillerin dispersiyon kontrolü ve tekstil yüzeyine homojen uygulanması halen teknik bir zorluktur. Fonksiyonların kalıcılığı için plazma uygulamaları, UV kürleme gibi yeni teknikler geliştirilmelidir. Biyobozunur polimerlerle birlikte kullanıldığında doğada çözünür fonksiyonel tekstil ürünleri üretilir.

2.3. Kaolin Uygulamaları

2.3.1. Kaolinitin Yapısı ve Özellikleri

Kaolin (kimyasal formülü: $Al_2Si_2O_5(OH)_4$), 1:1 yapı tipine sahip bir alüminyum silikat minerali olup, düşük plastiklik, düşük yüzey alanı ve yüksek kimyasal saflığıyla bilinir. Kaolinit kristalleri tipik olarak altıgen tabakalı yapılar oluşturur ve bu yapı onları hem dolgu maddesi hem de fonksiyonel kaplama malzemesi olarak kullanıma uygun hale getirir (Kök ve diğerleri, 2023).

2.3.2. Tekstil Uygulamalarında Kullanımı

Kaolin, tekstil üretiminin farklı aşamalarında hem kimyasal hem fiziksel modifiye edici olarak rol oynar. En yaygın kullanım alanları aşağıda özetlenmiştir:

Dolgu Maddesi Olarak Kullanım: Kaolin, lifli ve polimerik tekstil malzemelerine eklenerek ürünün mukavemeti ve dayanıklılığı artırılır. Özellikle nonwoven, teknik tekstil ve ambalaj tekstillerinde yaygındır. Polipropilen ve polyester esaslı nonwoven yapılarda, %10–30 kaolin katkısı ile termal stabilite ve mekanik dayanım artırılabilir (Tawfik ve diğerleri, 2018).

Fonksiyonel Kaplama Uygulamaları: Kaolin, yüzey kaplaması yoluyla tekstil ürünlerine alev geciktirici, UV koruyucu, antimikrobiyel özellikler kazandırır. Akıllı tekstillerde, nano-kaolin yüzey modifikasyonu ile kumaşların nem yönetimi ve ısı dengesine yardımcı olur (Zhang ve diğerleri, 2014).

Doğal Boyar Maddelerle Uyum: Kaolin, doğal boyar maddelerle (örneğin indigo, kök boya) yapılan tekstil boyamalarında mordant (bağlayıcı) olarak kullanılabilir. Bu durum renk kalıcılığını artırır ve kimyasal kullanımını azaltır.

2.3.3. Termal ve Mekanik Özellikler

Kaolin, düşük termal iletkenliği ve iyi mekanik özellikleri ile bilinen bir kil mineralidir. Yapısındaki alüminyum ve silikat bileşenleri, onu yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklı kılar. Özellikle %30 oranında kaolin içeren kompozitler, iyi dielektrik performans ve termal direnç sergileyerek, partikül dağılımı ve aglomerasyon açısından minimal bozulma göstermektedir (Buncianu ve diğerleri, 2024). Kaolin dolgu katkılı kompozit tekstil liflerinin bazı performans parametreleri aşağıdaki tabloda özetlenmiştir:

Tablo 5. Kaolin katkısının tekstil kompozitlerinin özelliklerine etkisi (Tawfik ve diğerleri, 2018)

Özellik	Saf Polimer	Kaolin Katkılı Kompozit
Termal Kararlılık (°C)	-250	-300
Çekme Dayanımı (MPa)	23	31
Su Emme Oranı (%)	6,5	3,2
Alev Geciktiricilik Sınıfı	B2	B1

2.3.4. Kaolinin Yüzey Modifikasyonu

Kaolinin tekstil kaplamalarında etkili kullanılabilmesi için yüzeyinin organik moleküllerle modifiye edilmesi gerekir. Bu sayede, polimer matris ile uyumluluk artırılır, dağılım homojenliği iyileştirilir ve fonksiyonel gruplarla (örneğin amino, karboksil) özel özellikler kazandırılır.

2.3.5. Sürdürülebilirlik ve Çevresel Etki

Kaolin, doğada bol bulunan, toksik olmayan ve biyolojik olarak inert bir mineraldir. Özellikle çevre dostu tekstil uygulamalarında; doğal kaynaklardan temin edilmesi, enerji ve su kullanımını azaltır, kimyasal modifikasyon ihtiyacının düşük olması, proses maliyetlerini düşürür ve biyobozunur tekstil ürünlerinde güvenle kullanılabilir. Avrupa Birliği'nin REACH düzenlemeleri kapsamında, kaolin katkılı ürünler düşük risk grubunda yer almaktadır (EU, 2023).

2.3.6. Zorluklar ve Gelişim Alanları

Mikron boyutundaki kaolin tanecikleri, yüksek çözünürlük isteyen tekstil yüzeylerinde homojenlik sorunları yaratabilir. Nano-kaolin üretimi için gereken ileri prosesler (ör. ultrasonik dispersiyon, plazma uygulamaları) halen maliyetlidir. Biyobazlı polimerlerle uyumunun artırılması için yüzey enerjisi mühendisliği gereklidir.

3. SONUÇ

Bu çalışmada, jeolojik malzemelerin – özellikle bazalt, kaolin ve çeşitli nanokil minerallerinin – tekstil mühendisliği uygulamalarındaki rolü detaylı olarak ele alınmıştır. İncelenen minerallerin hem tekstil ürünlerinin performansını artırmak hem de çevreye duyarlı üretim süreçlerine katkı sunmak açısından önemli potansiyel taşıdığı ortaya konmuştur.

Bazalt elyafları, üstün termal, mekanik ve kimyasal direnç özellikleri sayesinde teknik tekstil uygulamalarında sürdürülebilir ve yüksek performanslı bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Cam elyaflara göre daha düşük karbon ayak izi ve daha az işlem basamağı gerektirmesi, bazaltın çevresel açıdan avantajlı konumunu güçlendirmektedir.

Nanokiller (montmorillonit, sepiolit, halloysite vb.), hem tekstil atık sularının arıtılmasında hem de fonksiyonel tekstil kaplamalarının geliştirilmesinde önemli katkılar sunmaktadır. Özellikle doğal boyar maddelerle birlikte kullanılmaları, geri kazanım ve döngüsel ekonomi açısından stratejik bir avantaj sağlamaktadır.

Kaolin, tekstil ürünlerinde hem dolgu malzemesi hem de yüzey kaplama ajanı olarak çok yönlü kullanım alanlarına sahiptir. Doğal, toksik olmayan ve biyolojik olarak inert yapısı ile sürdürülebilir tekstil üretiminde önemli bir rol oynayabilir. Ayrıca kaolinin polimer matrislerle uyumlu hale getirilmesi, kompozit tekstil malzemelerinin performansını artırmaktadır.

Jeolojik kökenli mineraller, klasik katkı maddelerinin yerini alabilecek çevre dostu ve çok işlevli alternatifler sunmaktadır. Fonksiyonel tekstillerde, termal dayanım, UV koruma, antibakteriyellik gibi özellikler, mineral katkılı sistemlerle ekonomik biçimde elde edilebilmektedir. Sürdürülebilirlik açısından, bu doğal malzemeler düşük enerji tüketimi, atık geri kazanımı ve doğada çözünürlük gibi avantajlar sağlamaktadır. Disiplinlerarası iş birlikleri sayesinde yenilikçi ürün geliştirme potansiyeli oldukça yüksektir.

Bu çalışma, tekstil ve jeoloji mühendisliği disiplinlerinin kesişiminde yer alan, yenilikçi ve sürdürülebilir bir malzeme bilimi yaklaşımını desteklemektedir. Gerek akademik araştırmalarda gerekse endüstriyel uygulamalarda, bu iki

disiplinin ortaklığı ile geleceğin çevre dostu ve yüksek performanslı tekstil ürünleri geliştirilebilir.

KAYNAKÇA

- Asgar, H., Jin, J., Miller, J., Kuzmenko, I., Gadikota, G. (2021). Constrasting Thermally-Induced Structural and Microstructural Evolution of Alumino-Silicates with Tubular and Planar Arrangements: Case Study of Halloysite and Kaolinite, Colloids and Surface A: Physicochemical and Engineering Aspects, 613, 126106. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.126106>
- Ayub, T., Shafiq, N., & Khan, S. U. (2015). Compressive stress-strain behavior of HSFRC reinforced with basalt fibers. *Materials Science and Engineering: A*, 643, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.06.084>
- Buncianu, D., & Buncianu, A. (2024). Synthesis and characterization of acrylic resin/kaolin composites. *Polymers*, 16(23), 3376. <https://doi.org/10.3390/polym16233376>
- EU (2023). *Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM)*. European Union Commission, Retrieved from <https://climate.ec.europa.eu>
- GlobeNewswire. (2022). Basalt Fiber Market worth \$517 million by 2027 – Exclusive Report by MarketsandMarkets. Retrieved from <https://www.globenewswire.com/news-release/2022/07/22/2484364/0/en/Basalt-Fiber-Market-worth-517-million-by-2027-Exclusive-Report-by-MarketsandMarkets.html/>
- Guin, M., Singh, N. B., De, A. (2025) Clay and Clay Minerals: A Brief Review from Fundamentals to Applications. *Zastita Materijala*, 66, 1-28. <https://doi.org/10.62638/ZasMat1138>
- Hassine, A. B., Ayari, F., Salah, M. B., Ayadi, M. T. (2016). Absorption of an Anionic Textile dye from Wastewater by

- Bentonitic Clay Mineral, Surface Engineering and Applied Electrochemistry, 52(6):572-578.
<https://doi.org/10.3103/S1068375516060089>
- Karvanis, K., Rusnakova, S., Krejci, O., Zaludek, M. (2020). Preparation, Thermal Analysis, and Mechanical Properties of Basalt Fiber/Epoxy Composites. *Polymers*, 12(8):1785. <https://doi.org/10.3390/polym12081785>
- Kök, O.E., Özdemir, A., Erdoğan, Y., Palabıyık, Y., Şahinoğlu, A. (2023). Kıl Mineralleri ve Kolloidal Süspansiyonlar (Bölüm7), Bideci, A. (Editör), Mühendislik Alanında Uluslararası Araştırmalar, 116-137.
- Mancini, M. (2023). The Production of Basalt Fiber. In: The Basalt Fiber—Material Design Art. *SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-46102-6_2
- Mohktar, A., Asli, B., Abdelkrim, S., Hachemao, M., Boukoussa, B., Sassi, M., Viscusi, G., Abboud, M. (2024). Polymer/Clay Nanocomposites as Advanced Adsorbents for Textile Wastewater Treatment, *Minerals*, 14, 1216. <https://doi.org/10.3390/min14121216>
- Song, Q., Wang, H., Han, S., Wang, J., Zhang, B., Zhang, Y. (2020). Halloysite Nanotubes Functionalized cotton fabric for oil/water separation, *Progress in Organic Coating*, 148(33):105839. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105839>
- Tawfik, M. E., Ahmed, N. M., Ward, A. A. (2018). Characterization of Kaolin Filled Polymer Composites. *Society of Plastics Engineers*. 1-3. <https://doi.org/10.2417/spepro.004978>
- Vinokurov, V.A., Stavitskaya, A.V., Chudakov, Y.A., Ivanow, E.V., Shrestha, L.K., Ariga, K., Darrat, Y.A., Lvov, Y.M.

(2017) Formation of metal clusters in halloysite clay nanotubes, Science and Technology of Advanced Materials, 18:1, 147-151, <https://doi.org/10.1080/14686996.2016.1278352>

Zhang, S., Jiang, P., Liu, X., Gu, X., Zhao, Q., Hu, Z., Tang, W. (2014). Effects of Kaolin on the Thermal Stability and Flame Retardancy of Polypropylene Composite, Polymers for Advanced Technologies, 25(9). <https://doi.org/10.1002/pat.3325>

YENİ NESİL TEKSTİL MALZEMELERİ: AKILLI, SÜRDÜRÜLEBİLİR VE FONKSİYONEL YAKLAŞIMLAR

Devrim DEMİRAY SOYASLAN¹

1. GİRİŞ

Günümüzde tekstil malzemeleri, yalnızca konfor ya da estetik ile sınırlı olmaktan çıkmakta ve aynı zamanda akıllı, sürdürülebilir ve fonksiyonel malzeme modeline dönüşmektedir. Bu dönüşümde tekstil malzemesinin yapısına entegre edilen sensörler çevresel ve biyolojik verilere tepki verebilir hale gelirken, enerji hasadı ve biyo bazlı malzeme kullanımının sürdürülebilirliğini artırmaktadır. Bu bölüm, yeni nesil tekstil malzemelerindeki üç eğilim olan akıllılık, çevresel duyarlılık ve fonksiyonellik unsurlarını disiplinler arası bir perspektifle incelemeyi amaçlamaktadır.

Akıllı tekstiller giderek daha entegre sistemlere dönüşerek; sensörler, nanoteknoloji, kablosuz iletişim ve enerji hasadı gibi teknolojilerin birleşerek, hafif, yüksek performanslı ve kullanıcı dostu giyilebilir teknolojiler oluşturmaktadır (Younes, 2023). Özellikle sağlık ve spor alanında, bu teknolojiler kişiye özel veri toplama, gerçek zamanlı izleme ve geri bildirim sağlamaktadır (Xu ve diğerleri, 2025).

Öte yandan, sürdürülebilirlik baskısı altındaki tekstil endüstrisi giderek, geri dönüşüm ve eko-tasarım stratejilerine doğru yönelmektedir. Akıllı tekstil uygulamalarında kullanılan

¹ Doç. Dr. Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, dsayaslan@mehmetakif.edu.tr, ORCID: 0000-0002-5145-8551.

malzemelerin çevresel olumsuz etkisini azaltmak üzere geliştirilen bu stratejiler, hem üretim hem de kullanım aşamalarında ekolojik yararlar sağlamaktadır (Tavares ve diğerleri, 2025).

Günümüz ve gelecek perspektifinden bakıldığında enerji özerkliği, akıllı tekstillerin gelecek vizyonunu şekillendirmeye devam etmektedir. Self-powered sistemler, mekanik veya elektromanyetik çevre enerjisini kullanarak sensörleri ve iletimi desteklemektedir. Triboelektrik nanogeneratörler, RF enerjisi dönüştürücüleri ve entegre enerji depolama sistemleri buna örnek olarak verilebilir. Bu sayede akıllı giysiler, dış kaynaktan gelen harici enerjiye bağımlı olmadan çalışabilmektedir (Dejene, 2025; Tavares ve diğerleri 2025).

Akıllı sistem entegrasyonu, çevresel sürdürülebilirlik ve enerji özerkliği dikkate alınarak hazırlanmış olan bu çalışma aşağıda belirtilen konular üzerine odaklanmaktadır:

- Akıllı Tekstiller: Sensör entegrasyonu, veri toplama, kullanıcı etkileşimi
- Sürdürülebilir Yaklaşımlar: Geri dönüşüm, biyomalzeme kullanımı, çevre dostu tasarım
- Enerji Hasadı ve Özerklik: Mekanik ve RF enerji toplama, self-powered sistemler
- Fonksiyonellik ve Malzeme İnovasyonu: Nanomalzemeler, akıllı kaplamalar, enerji-harvest edebilen yapılar
- Geçmişten Geleceğe Perspektif: Sektör trendleri, zorluklar ve öneriler

2. AKILLI TEKSTİL MALZEMELERİ VE TEKNOLOJİK GELİŞİMLERİ

Akıllı tekstiller, tekstil yüzeylerine doğrudan entegre sensör, aktüatör, elektronik devre ve enerji sistemleri sayesinde çevresel, biyometrik ya da sistemsel sinyalleri algılayarak tepki verebilen gelişmiş malzemelerdir. Bu bölümde dört alt başlık altında mevcut teknolojik gelişmeler ele alınmaktadır (Tablo 1):

Tablo 1. Akıllı Tekstil Teknolojilerinde Temel Yaklaşımlar

Uygulama Alanı	Temel Teknoloji / Yaklaşım	Özet İçerik & Kaynaklar
Adaptif Giysi Tasarımı	Akıllı tekstil malzemeleri ve elektronik sistemler	Abtew ve diğerleri, (2025): fonksiyonel ve adaptif yaklaşımlar
Enerji Hasadı	Self-powered sistemler, polipirrol işlevsel tekstiller	Dejene (2025); Ferreira ve diğerleri (2025): IoT uygulamaları ile enerji entegrasyonu
Çok Fonksiyonlu Kompozit	Fiber takviyeli yapılar, mekanik dayanım & fonksiyon	Chaudhary ve diğerleri (2024): akıllı kompozit derlemesi
2D Nanomalzemeler	Grafen, MXenes gibi malzemelerle performans artırımı	Choi ve diğerleri (2025): 2D materyallerin akıllı tekstillere entegrasi

2.1. Uyarlanabilir Giyim Tasarımı

Akıllı ve elektronik tekstil malzemeleri, giyilebilir adaptif giysilerde işlevsel tasarım ve yenilikler sunar. Bu alandaki teknolojileri sistematik olarak derleyerek, fonksiyonel yaklaşımın gelecekteki yönelimlerini kapsayan kapsamlı bir analiz sunmaktadır (Abtew ve diğerleri, 2025).

2.2. Enerji Hasadı ve Self-Powered Sistemler

Akıllı tekstillerin enerji bağımsızlığı, bu alandaki malzemelerin gelecekteki vizyonlarının temel taşlarından biridir. Bu bağlamda mekanik veya elektromanyetik çevre enerjisini kullanarak çalışan “self-powered” smart textile sistemleri ayrıntılı biçimde çalışılmaktadır (Dejene, 2025). Ayrıca Polipirrol işlevsel tekstillerle IoT (Internet of Things,

IoT=nesnelerin interneti uygulamalarında enerji hasadı ve hareket takibi üzerine yapılan çalışmalar da bu alanda önemli katkılar sunmaktadır (Ferreira ve diğerleri, 2025).

2.3. Fonksiyonel Çok Katmanlı Kompozitler

Akıllı tekstillerde fiberlerle güçlendirilmiş fonksiyonel kompozit yapılar, sundukları dayanıklılık ve işlevsellik gibi avantajlar nedeniyle önem taşımaktadır (Chaudhary ve diğerleri, 2025).

2.4. 2D Nanomalzemelerin Entegrasyonu

Grafen, MXenes ve benzeri 2D malzemelerin akıllı tekstillere entegrasyonu, performansı hem mekanik hem iletkenlik açısından artırmaktadır (Choi ve diğerleri, 2025).

3. SÜRDÜRÜLEBİLİR YAKLAŞIMLAR

Tekstil teknolojisinde sürdürülebilirlik; kaynak kullanımında verimlilik, çevresel etkiyi azaltma, geri dönüşüm ve biyobazlı malzemelerin kullanımı gibi çok boyutlu bir yaklaşıma dayanır (Şekil 1). Bu bölümde, smart tekstillerde sürdürülebilirlik alanındaki yenilikçi yöntemler ve stratejiler literatüre dayalı olarak ele alınmaktadır (Tablo 2).

3.1. Geri Dönüşüm ve Eko-Tasarım Stratejileri

Geri dönüşüm odaklı akıllı tekstil tasarımlarının geliştirilmesi ve yaşam döngüsü değerlendirmeleri konusunda kapsamlı analizler sunmaktadır. Bu çalışmalar, eko-tasarım prensiplerinin entegre edilerek hem performans hem çevre dostu sonuçlara ulaşılabileceğini vurgulamaktadır (Tadesse ve diğerleri, 2025).



Şekil 1. Geri dönüştürülmüş tekstil döngüsü (Tadesse ve diğerleri, 2025)

Ayrıca sağlık izleme amaçlı smart kıyafetler geliştirilirken geri dönüştürülebilir materyallerin kullanımına özellikle önem verilmektedir (Ahsan ve diğerleri, 2022).

3.2. Biyobazlı ve Çevre Dostu Nanomalzemeler

Çevresel ve biyomedikal kullanımlar için yeşil nanomalzemelerin smart tekstillere entegrasyonu değerlendirilerek; biyolojik olarak parçalanabilen, toksik olmayan ve sürdürülebilir nanomalzemelerin geleceğin tekstillerinde kilit rol oynayacağı belirtilmektedir (Popescu & Ungureanu, 2023). PLEDOT:PSS mikrofiberlerle yapılan çalışmalarda ise ısı algılama ve joule ısıtma gibi işlevlerin biyobazlı yapılarla desteklenebileceği kanıtlanmaktadır (Li ve diğerleri, 2023).

Tablo 2. Sürdürülebilir Smart Tekstil Yaklaşımları

Yaklaşım	Açıklama	Kaynaklar
Geri Dönüştürülebilir Tasarım	Akıllı malzemelerde eko-tasarım ve yaşam döngüsü yaklaşımı	Tadesse ve diğerleri (2025); Ahsan ve diğerleri (2022)
Biyobazlı ve Yeşil Nanomalzemeler	Toksik olmayan, doğada çözünür, çevre dostu malzemeler	Popescu & Ungureanu (2023); Li ve diğerleri (2023)
Saha Uygulamaları ve Performans	Kullanıcı temelli testler ve saha-laboratuvar geçişi	Veske-Lepp ve diğerleri (2024)
Döngüsel Ekonomi Perspektifi	Modüler, tekrar kullanılabilir ve enerji-etkin smart tekstiller	Júnior ve diğerleri (2022); Abtew ve diğerleri (2025)

3.3. Saha Uygulaması ve Test Süreçleri

Dar kumaş e-tekstil sistemlerinin laboratuvarından saha testlerine geçerken karşılaşılan zorluklar, kullanıcı değerlendirmeleri ve sürdürülebilir materyal seçimleri incelenerek tartışılmaktadır (Veske-Lepp ve diğerleri, 2024).

3.4. Gelecek Perspektifleri ve Döngüsel Ekonomi

Yeşil akıllı tekstiller, döngüsel ekonomi kapsamında yeniden kullanılabilirlik, modüler tasarım ve enerji-etkin performans kriterlerini kapsayarak geleceğin sürdürülebilir malzemeleri arasında öne çıkmaktadır (Júnior ve diğerleri, 2022; Abtew ve diğerleri, 2025). Biyobazlı, yeniden dönüştürülebilir ve özerk enerji sistemlerine sahip smart tekstiller, endüstrinin çevre dostu bir geleceğe evrilmesini destekleyen kritik adımlardır.

4. ENERJİ HASADI VE FONKSİYONELLİK

Enerji bağımsızlığı, akıllı tekstillerin sürdürülebilir ve otonom sistemler olmasında kritik bir faktördür. Bu bölümde, enerji hasadı teknolojileri ve bu sistemlerin tekstil malzemeleriyle entegrasyonu güncel literatür üzerinden değerlendirilmiştir (Tablo 3).

Tablo 3. Enerji hasadı ve fonksiyonellik yaklaşımlarına ait uygulama örneklerinin özellikleri

Teknik Yaklaşım	Temel İşlev	Avantajlar / Notlar	Örnek Kaynaklar
Self-powered polipirrol tekstiller	Hareketten enerji üretim ve IoT uygulamaları	Esnek, sürdürülebilir sistemler	Ferreira ve diğerleri, (2025)
Piezoelektrik katmanlı akıllı sensörler	Titreşim/merkezi kuvvetle enerji üretimi	Yüksek hassasiyet, gömülü sensör desteği	Xiang ve diğerleri, (2024)
Triboelektrik nanogeneratör (TENG)	İnsan hareketiyle enerji üretimi	Hafif, esnek, giyilebilir enerji kaynağı	Zhao ve Hu, (2024)
Kullanıcı konforu ve uygulama optimizasyonu	Akıllı tekstillerde ergonomi ve işlevsellik	Gerçek kullanıma uygun ürün tasarımı	Xu ve diğerleri, (2025)

4.1. Kendi Kendini Güçlendiren Tekstiller

Akıllı tekstiller günümüzde; çevresel, mekanik veya elektromanyetik enerjiyi dönüştürerek kendi elektriğini üreten sistemlere dönüşmektedir (Dejene, 2025). Bu teknolojiler sayesinde giyilebilir sistemler, harici enerji kaynaklarına bağımlı olmaktan kurtulmuştur. Ayrıca polipirrol işlevli tekstillerle hem enerji hasadı hem de hareket takibi sağlayan IoT destekli giyilebilir sistemler geliştirilmiş ve bu sayede fonksiyonellik ve özerklik artırılmıştır (Ferreira ve diğerleri, 2025).

4.2. Nanogeneratör Sistemleri ve Triboelektrik Teknolojiler

Triboelectric ve piezoelectric nanogeneratörler (TENG, PSTS gibi) özellikle hareketten enerji toplamak için idealdir (Şekil 2). PVDF film tabakalı piezoelektrik akıllı tekstil sensörünün üretim süreci, voltaj ve akım çıktılarının deneysel analizleri üzerine çalışmalar son yıllarda yoğunlaşmıştır (Xiang ve diğerleri, 2024). Bu sistemler, akıllı giysilerde gömülü sensörlere enerji sağlama konusunda büyük bir potansiyel taşımaktadır (Zhao ve Hu, 2024).



Şekil 2. Triboelektrik nanogeneratör (TENG) tabanlı akıllı tekstil prensibi (Zhao ve Hu, 2024)

4.3. Fonksiyonellik ve Konfor Dengesi

Akıllı tekstillere enerji entegrasyonu; genellikle ısı konforu, esneklik ve hafiflik gibi kullanıcı deneyimi (UX) unsurları ile dengelenmelidir. Bu durumun önemine vurgu yapılarak, spor ve sağlık uygulamaları için tasarlanan tekstillerde hem performansı hem de konforu sürdürmenin önemine vurgulandığı çalışmalar günümüzde giderek artmaktadır (Xu ve diğerleri, 2025).

5. UYGULAMA ALANLARI VE GERÇEK HAYAT SENARYOLARI

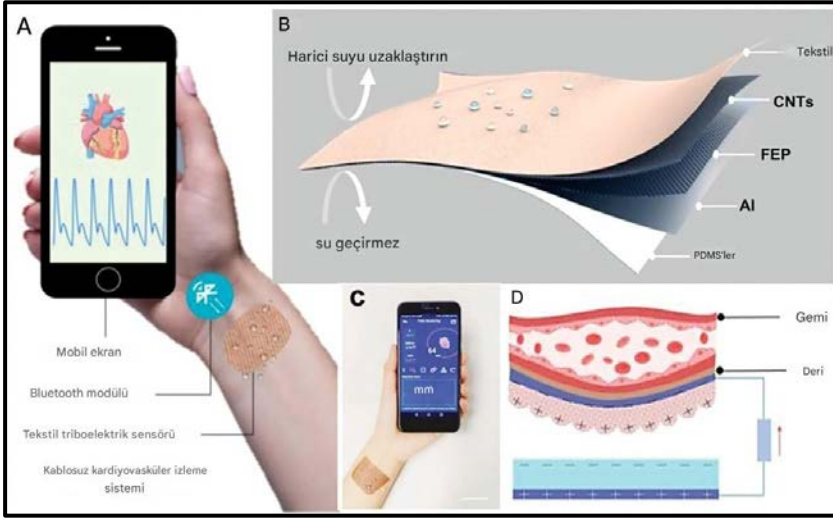
Yeni nesil tekstil malzemeleri, sadece teknolojik yenilik değil aynı zamanda fonksiyonellik, sürdürülebilirlik ve kullanıcı odaklı tasarım açısından da devrim yaratmıştır. Aşağıdaki alt başlıklarda, farklı disiplinlerde akıllı ve sürdürülebilir tekstil uygulamaları örneklerle incelenmektedir (Tablo 4).

Tablo 4. Uygulama Alanlarına Göre Akıllı Tekstil Fonksiyonları

Uygulama Alanı	Öne Çıkan Özellikler	Kaynaklar
Sağlık	Biyosensör, konfor, kişiselleştirilmiş izleme	Xu ve diğerleri (2025); Popescu & Ungureanu (2023)
Spor	Isıl dengeleme, hareket izleme	Li ve diğerleri. (2023)
Savunma	IR kamuflaj, çevresel adaptasyon	Degenstein ve diğerleri (2021)
Tarım	Enerji hasadı, uzak veri toplama	Tavares ve diğerleri (2025)
Sanayi & İş Güvenliği	Tehlike algılama, uyarı sistemleri	Júnior ve diğerleri (2022)

5.1. Sağlık ve Biyomedikal Uygulamalar

Akıllı tekstil sensörleri; kalp ritmi, vücut ısısı ve solunum gibi biyofizyolojik parametreleri izleyerek gerçek zamanlı sağlık takibi sağlamaktadır (Şekil 3).



Şekil 3. Kalp atışı ve vücut sıcaklığı izleme örneği a.Kablosuz kardiyovasküler izleme sistemi, b.Tekstil sensörünün yapısı, c.Cep telefonu aracılığıyla gerçek zamanlı nabız izleme, d.Radyal arter nabzına yanıt olarak bir tekstil triboelektrik sensörünün elektrik üretimi. (Xu ve diğerleri, 2025)

Kişiselleştirilmiş sağlık hizmetleri için geliştirilen akıllı tekstillerin kullanıcı konforunu da ön planda tutarak spor ve

medikal uygulamalarda büyük potansiyel sunduğu belirtilmektedir. Bu sistemler, özellikle kronik hastalıkların izlenmesinde çok önemli rol oynamaktadır (Xu ve diğerleri, 2025).

Ayrıca, geliştirilen yeşil nanomalzeme temelli akıllı tekstiller, hem çevre hem de insan sağlığı açısından toksik olmayan alternatifler sunarak biyomedikal alanda kullanımlar için önemli bir pazar oluşturmaktadır (Popescu & Ungureanu, 2023).

5.2. Spor Teknolojileri

Akıllı giyilebilir sistemler; sporcularda performans takibi, kas aktivitesi ölçümü ve ısı düzenleme gibi işlevlerle rekabet avantajı sağlamaktadır. PEDOT:PSS mikrofiberli akıllı tekstillerin termal algılama ve ısıtma gibi çift yönlü işlevlerle sunduğu imkanlar, bu mikrofiberlerin spor giyimi alanında devrim yarattığını göstermiştir. Bu teknoloji özellikle açık hava sporlarında kullanıcı güvenliğini artırmaktadır (Li ve diğerleri, 2023).

5.3. Savunma ve Kamuflaj Sistemleri

Akıllı tekstillerin en kritik uygulama alanlarından biri de savunma sanayidir. Kızılötesi (IR) ve görünür ışık kamuflajına olanak tanıyan mikro yapılarla geliştirilmiş akıllı tekstillerin, askeri giyimde kullanılabilecek yeni nesil ürünlere öncülük ettiği belirtilmektedir. Bu tekstiller, düşman algılamasını azaltan ve çevresel adaptasyonu artıran sistemler sunmaktadır (Degenstein ve diğerleri, 2021).

5.4. Tarım ve Çevre İzleme Sistemleri

Çevresel koşulların izlenmesinde kullanılan akıllı tekstil sistemleri, hassas tarım uygulamaları için yeni bir araç sunmaktadır. RF enerjisini hasat ederek çalışan tekstil entegre sistemleri, tarımda uzak alanlarda veri toplama ve enerji

bağımsızlığı sağlamada önemli katkılar sunmaktadır. Bu sistemler, su kullanımı optimizasyonu ve toprak nem takibi gibi alanlarda da kullanılmaktadır (Tavares ve diğerleri, 2025).

5.5. Endüstriyel ve İş Güvenliği Uygulamaları

İş güvenliği giysilerine entegre edilen akıllı sistemler, sıcaklık, kimyasal sızıntı veya titreşim gibi riskleri tespit ederek uyarı sistemlerini devreye sokmaktadır. Bu tür giysilerin sanayi tesislerinde kullanımı, iş kazalarının önlenmesinde önemli katkılar sunmaktadır (Júnior ve diğerleri, 2022).

6. SONUÇ

Tekstil teknolojisi, 21. yüzyılın başından itibaren yalnızca giyinme işlevinin ötesine geçerek; sağlık, savunma, enerji, çevre ve endüstri gibi disiplinler arası alanlarda aktif bir rol üstlenmiştir. Bu dönüşümde nanoteknolojik yapıların ve akıllı sensörlerin tekstil ürünlerine entegre edilmesi büyük önem taşımaktadır.

Akıllı tekstil teknolojileri, adaptif giyim, enerji özerkliği, çok fonksiyonlu kompozit entegrasyonu ve nanomalzeme kullanımında kayda değer ilerlemelere sahiptir. Gelecekte, biyobazlı malzemeler, geri dönüştürme stratejileri ile birlikte bu teknolojilerin sürdürülebilir kalitede geliştirilmesi önemli bir araştırma alanı olacaktır. Enerji hasadı teknolojileri, akıllı tekstillerin enerji bağımsızlığı ve kullanım alanlarını genişletmede önemli bir rol oynamaktadır. Self-powered sistemler, piezoelektrik ve triboelektrik yaklaşımlar hem bilimsel hem de uygulama açısından büyük potansiyel taşımaktadırlar.

Özellikle akıllı ve sürdürülebilir tekstillerin gelişimi; çevresel etkileri azaltan, enerji hasadı sağlayan ve kullanıcıyla etkileşime giren yeni malzeme sistemlerinin ortaya çıkmasını sağlamıştır. Güncel çalışmalar, kendi kendine enerji üreten

tekstillerin endüstriyel uygulanabilirliğini ortaya koymaktadır. Triboelektrik nanogeneratör (TENG) teknolojisi, esnek elektronik sistemlerle entegre edilerek özellikle giyilebilir cihazlarda enerji bağımsızlığı sağlamaktadır. Benzer şekilde, PEDOT:PSS gibi fonksiyonel mikrofiberler, akıllı tekstillerin konfor, esneklik ve işlevsellik taleplerini karşılamak için geliştirilmiştir.

Sürdürülebilirlik ise, döngüsel ekonomi prensipleri doğrultusunda geri dönüştürülebilir lifler, eko-tasarım ilkeleri ve biyobozunur malzemelerle desteklenmektedir. Ayrıca, sağlık, savunma, tarım, spor ve iş güvenliği gibi farklı sektörlerde bu teknolojilerin ticarileştirilmesine yönelik örnekler artmakta ve saha testleri başarıyla yürütülmektedir.

KAYNAKÇA

- Abtew, M.A., Atalie, D., Dejene, B.K., McBee-Black, K., 2025. Intelligent and electronic textile materials for adaptive apparel: innovations, functional design, and future directions, 15280837251346788 J. Ind. Text. 55. <https://doi.org/10.1177/15280837251346789>
- Ahsan, M., Teay, S.H., Sayem, A.S.M., Albarbar, A., 2022. Smart clothing framework for health monitoring applications. Signals 3, 113–145. <https://doi.org/10.3390/signals3010009>
- Chaudhary, B., Winnard, T., Oladipo, B., Das, S., Matos, H., 2024. Review of fiber-reinforced composite structures with multifunctional capabilities through smart textiles. Textiles 4, 391–416. <https://doi.org/10.3390/textiles4030023>
- Choi, Y., Kim, J., Lee, J., Chen, X., Seo, B., Choi, W., 2025. Recent progress on 2D-material-based smart textiles: materials, methods, and multifunctionality. Adv. Eng.Mater. n/a, 2500188. <https://doi.org/10.1002/adem.202500188>
- Degenstein, L.M., Sameoto, D., Hogan, J.D., Asad, A., Dolez, P.I., 2021. Smart textiles for visible and IR camouflage application: state-of-the-art and microfabrication path forward. Micromachines 12, 773. <https://doi.org/10.3390/mi12070773>
- Dejene, B. K. (2025). The future of fabric: A comprehensive review of self-powered smart textiles with a focus on their materials, energy-harvesting and emerging applications. Energy Reports, 14: 898-943. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.07.002>

- Ferreira, G., Das, S., Coelho, G., Silva, R.R.A., Goswami, S., Pereira, R.N., Pereira, L., Fortunato, E., Martins, R., Nandy, S., 2025. Energy harvesting and movement tracking by polypyrrole functionalized textile for wearable IoT applications. *J. Energy Chem.* 102, 230–242. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2024.10.028>
- Júnior, H.L.O., Neves, R.M., Monticeli, F.M., Dall Agnol, L., 2022. Smart Fabric Textiles: Recent Advances and Challenges. *Textiles* 2, 582–605. <https://doi.org/10.3390/textiles2040034>
- Li, Y., Hu, H., Salim, T., Cheng, G., Lam, Y.M., Ding, J., 2023. Flexible wet-spun PEDOT: PSS microfibers integrating thermal-sensing and joule heating functions for smart textiles. *Polymers* 15, 3432. <https://doi.org/10.3390/polym15163432>
- Popescu, M., Ungureanu, C., 2023. Green nanomaterials for smart textiles dedicated to environmental and biomedical applications. *Materials* 16, 4075. <https://doi.org/10.3390/ma16114075>
- Tadesse, M.G., Abate, M.T., Lübben, J. F., Rauch, M. (2025). Recycling and Sustainable Design for Smart Textiles. *Advanced Sustainable Systems*. 2401072, 1-25. <https://doi.org/10.1002/adsu.202401072>
- Tavares, J., Lacik, J., Pinho, P., Raida, Z., & Alves, H. (2025). Advancing sustainable RF energy harvesting for wearable electronics with 2.45 GHz textile-printed rectennas. *Scientific Reports*, 15, 24429. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-09966-0>
- Veske-Lepp, P., Vandecasteele, B., Thielemans, F., De Glas, V., Delaplace, S., Allaert, B., Dewulf, K., Depré, A., Bossuyt, F., 2024. Study of a narrow fabric-based e-textile

system—from research to field tests. *Sensors* 24, 4624.
<https://doi.org/10.3390/s24144624>

Xiang, H., Li, Y., Liao, Q., Xia, L., Wu, X., Zhou, H., Li, C., Fan, X., 2024. Recent advances in smart fabric-type wearable electronics toward comfortable wearing. *Energies* 17.
<https://doi.org/10.3390/en17112627>

Xu, Z., Zhang, C., Wang, F., Yu, J., Yang, G., Surmenev, R. A., Li, Z., & Ding, B. (2025). Smart Textiles for Personalized Sports and Healthcare. *Nano-Micro Letters*, 17, 232.
<https://doi.org/10.1007/s40820-025-01749-6>

Younes, B. (2023). Smart E-textiles: A review of their aspects and applications. *Journal of Industrial Textiles*, 53(3), 1–23.
<https://doi.org/10.1177/15280837231215493>

Zhao, Z., Hu, Y. (2024). Textile Triboelectric Nanogenerator: Future Smart Wearable Energy-Integration Technology. *Advance Materials Technologies*, 9,2302012: 1-22.
<https://doi.org/10.1002/admt.202302012>

TEKSTİL BİLİMLERİ VE MÜHENDİSLİĞİ
DEĞERLENDİRMELERİ

yaz
yayınları

YAZ Yayınları
M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar / AFYONKARAHİSAR
Tel : (0 531) 880 92 99
yazyayinlari@gmail.com • www.yazyayinlari.com